Leistungsmessung und Leistungsregulierung in Mehrphasennetzen mittels Halbleitern

Von

M. J. O. STRUTT und S. F. SUN

Mitteilung aus dem Institut für höhere Elektrotechnik der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich

Mit 25 Textabbildungen

(Eingegangen am 19. Juli 1955)

I. Fragestellung, Werkstoffdaten

Mit Hilfe synthetischer Halbleiter, wie Indiumantimonid, werden Hallspannungen und -Leistungen erhalten, welche die früher bekannten Werte um ein Vielfaches übersteigen [2], [7], [8], [9][1]. Diese Halbleiter wurden bereits als Leistungsmesser in Einphasennetzen verwendet [5]. Ziel der vorliegenden Arbeit ist, mit Hilfe solcher Halbleiter Leistungsmesser für Mehrphasennetze zu bauen, welche folgende Eigenschaften aufweisen:

1. Die gesamte Leistung (Wirkleistung, Blindleistung, oder Scheinleistung) des Mehrphasennetzes wird durch eine einzige Anzeige gegeben.

2. Diese Anzeige muß innerhalb der Fehlergrenzen für die Klasse 0,2 liegen, namentlich auch bei veränderlicher Umgebungstemperatur zwischen etwa 5 und 40 Grad C.

3. Dem Leistungsmesser soll eine Anzeigeleistung von mindestens einigen Milliwatt entnommen werden können, damit Übertragung und Anwendung dieser Leistung für Regelungszwecke möglich wird.

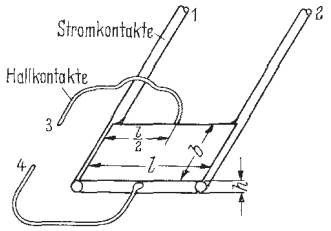

Bild 1. Schematischer Aufbau der Hallplättchen.

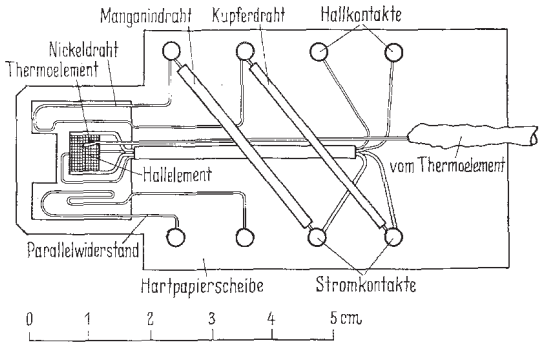

Bild 2. Anordnung eines Hallplättchens in einer Aussparung einer Hartpapierscheibe.

Für diese Arbeit waren dem Institut drei Plättchen aus Indiumantimonid von Herrn Prof. Dr. H. WELKER (Siemens-Schuckertwerke, Erlangen) in dankenswerter Weise zur Verfügung gestellt worden. Die Abmessungen zweier Plättchen sind folgende:

Plättchen 1: Länge l 6,5 mm, Breite b 4,2 mm, Dicke h 0,37 mm.
Plättchen 2: Länge l 6,4 mm, Breite b 5,5 mm, Dicke h 0,41 mm.

Die Anordnung der Stromkontakte 1, 2 und der Hallkontakte 3, 4 wird in Bild 1 gezeigt. Die Plättchen wurden auf eine Hartpapierscheibe angeordnet, wie in Bild 2 gezeigt. Bei den Vorversuchen wurde ein Elektromagnet üblicher Bauart mit auswechselbaren Polschuhen verwendet. Die magnetische Induktion wird mit Hilfe eines Induktionsmessers, beruhend auf dem Halleffekt eines Germaniumkristalls gemessen, der vorher mit Hilfe eines bekannten magnetischen Feldes geeicht worden war. Einige Hallmeßdaten für die Plättchen 1 und 2 sind in Bild 3 und 4 zusammengestellt worden.

Für die Leistungsmessung in Mehrphasennetzen bei 50 Hz Netzfrequenz ist es wesentlich, daß die Hallspannung bei Wechselinduktionen und Wechselströmen durch das Hallelement bis zu

[1] Diese Zahlen beziehen sich auf das Schrifttum.

Frequenzen von etwa 1000 Hz ihre Größe nicht ändert. Nur dann können auch die Oberwellenleistungen einwandfrei bestimmt werden. Die Hallspannung u_{h1} bei einer konstanten magnetischen Induktion und bei einem Wechselstrom konstanten Effektivwertes aber veränderlicher Frequenz durch das Hallelement wurde in der Schaltung von Bild 5 gemessen. Das Verhältnis

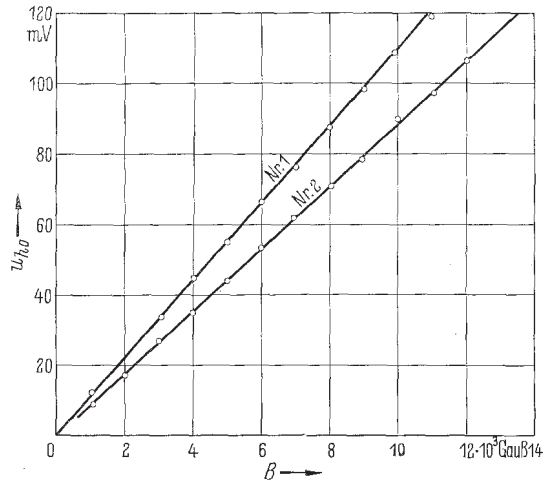

Bild 3. Hallspannung u_{h0} (vertikal) zwischen den Kontakten 3, 4 des Hallelementes von Bild 1 als Funktion der Induktion B (Gauß) bei einem Strom i_s = 100 mA durch das Hallplättchen für die Hallelemente Nr. 1 und Nr. 2.

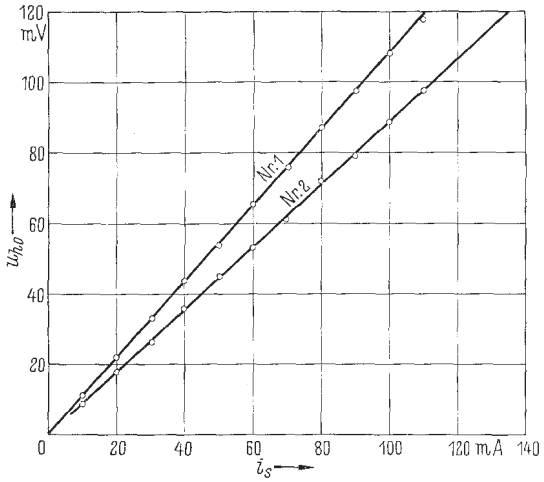

Bild 4. Hallspannung u_{h0} (vertikal) als Funktion des Stromes i_s durch das Hallplättchen bei einer Induktion B = 10000 Gauß für die Hallelemente Nr. 1 und Nr. 2.

u_{h1}/u_{h0}, wo u_{h0} den Wert von u_{h1} für die Frequenz Null des Wechselstromes bezeichnet, ist nach diesen Messungen in folgender Tabelle angegeben worden:

Freq. Hz.	0	50	100	250	350	750	2000	2500	3000
u_{h1}/u_{h0}	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,996	0,992.

Andererseits wurde die Hallspannung u_{h1} gemessen bei einem konstanten Gleichstrom durch das Hallelement bei einer magnetischen Induktion konstanten Effektivwertes aber veränderlicher Frequenz. Das Schaltbild dieser Messung ist in Bild 6 gezeichnet worden. Das Verhältnis von u_{h1}

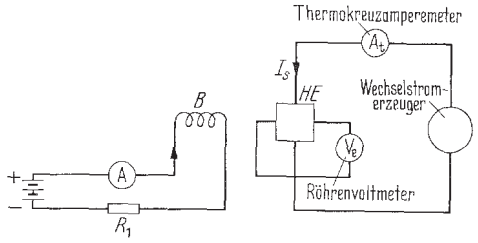

Bild 5. Meßanordnung zur Bestimmung der Frequenzabhängigkeit der Hallspannung des Hallelementes HE bei konstanter Induktion B und bei einem Strom I_s veränderlicher Frequenz durch das Hallelement.

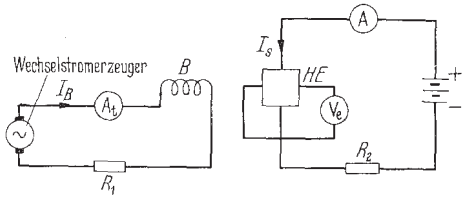

Bild 6. Meßanordnung zur Bestimmung der Frequenzabhängigkeit der Hallspannung des Hallelementes HE bei konstantem Strom I_s durch das Hallelement und bei einer Induktion B von veränderlicher Frequenz.

zu u_{h0}, wo u_{h0} wieder den Wert von u_{h1} bei der Frequenz Null bezeichnet, wird nach diesen Messungen durch folgende Tabelle gegeben:

Freq. Hz	0	50	400	600	800
u_{h1}/u_{h0}	1,00	1,00	0,998	1,002	1,00.

Offenbar ist die obige Frequenzforderung bezüglich des Halleffektes hier erfüllt.

Wattmeter sollen bei veränderlicher Umgebungstemperatur innerhalb bestimmter Grenzen die Leistung temperaturunabhängig anzeigen. Die Hallspannung ist aber stark temperaturabhängig bei konstanter Induktion und konstantem Strom durch das Hallelement, wie die in Bild 7 enthaltenen Meßergebnisse zeigen (vgl. [7]). Auch der Widerstand des Hallelementes, gemessen zwischen den Stromkontakten (1, 2, in Bild 1) ist bei konstanter Induktion und konstantem

Strom durch das Hallelement stark temperaturabhängig, wie die in Bild 8 enthaltenen Meßergebnisse zeigen. Schließlich ist dieser Widerstand infolge des GAUSSeffektes von der magnetischen Induktion abhängig. Die betreffende Abhängigkeit wurde bei den obigen Hallelementen 1 und 2

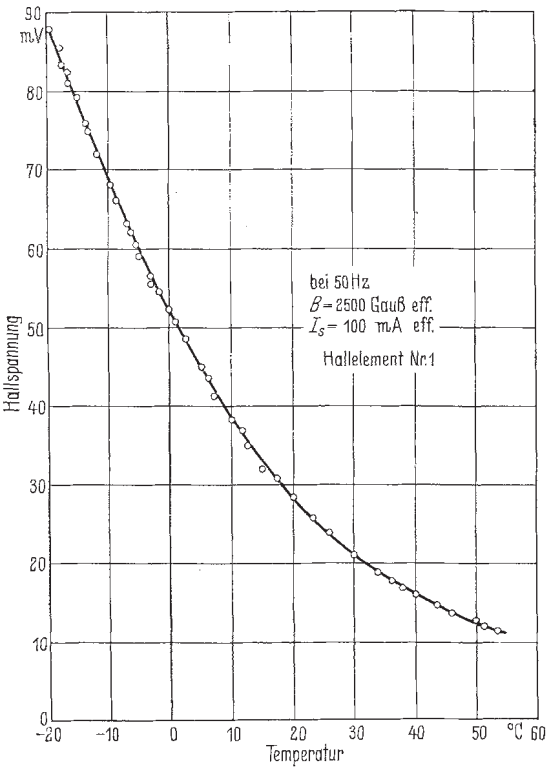

Bild 7. Hallgleichspannung des Hallelementes Nr. 1 als Funktion der Temperatur bei einer Wechselinduktion B von 50 Hz, 2500 Gauß Effektivwert und bei einem gleichphasigen Wechselstrom I_s von 50 Hz, 100 mA Effektivwert.

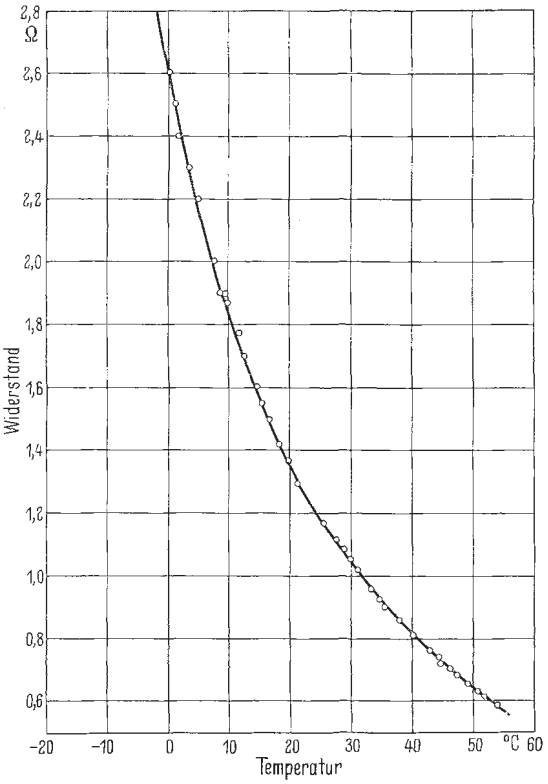

Bild 8. Widerstand zwischen den Stromkontakten 1, 2 des Bildes 1 als Funktion der Temperatur für das Hallplättchen Nr. 1.

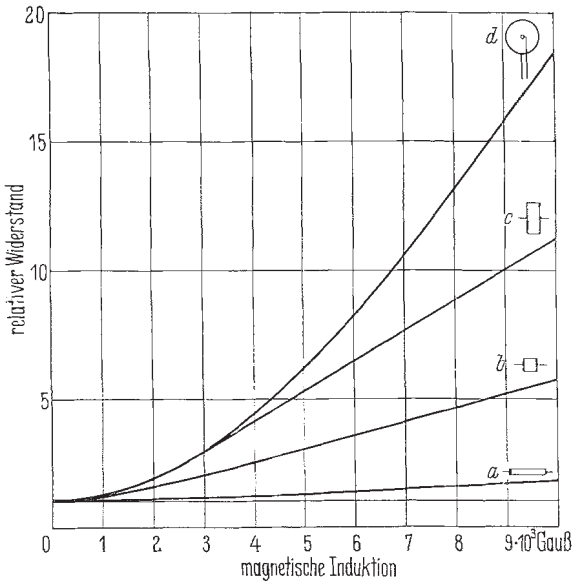

Bild 9. Verhältnis des Widerstandes bei der Induktion B zum Widerstand bei der Induktion $B = 0$ zwischen den Stromkontakten 1, 2 des Bildes 1 als Funktion der Induktion B für verschiedene Gestalt des Hallplättchens. Kurven a bis c verschiedene Verhältnisse von Länge zu Breite. Kurve d Corbinoscheibe.

nicht gemessen, weil sie, wie wir sehen werden, bei der vorliegenden Verwendungsart dieser Hallelemente keine Rolle spielt. Einen Eindruck der Größenordnung der betreffenden Widerstandsänderungen beim vorliegenden

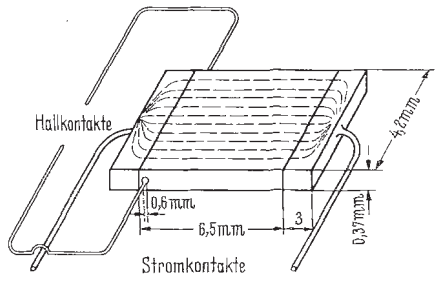

Bild 10. Schematische Zeichnung der Anordnung der Hallkontakte nahe an einem der Stromkontakte.

Halbleiterwerkstoff vermittelt das Bild 9 (vgl. [9]).

Für einige der unten angegebenen Wattmeterschaltungen ist es wichtig, die Hallspannung nicht zwischen den Zentren der

Seitenflächen, sondern zwischen anderen Punkten zu entnehmen. Das Bild 10 zeigt eine der Anordnungen der Hallkontakte. Das Bild 11 zeigt, daß die hierbei gemessene Hallspannung die gleiche ist, wie jene zwischen den Zentren der Seitenflächen. Die Bilder 12, 13 und 14 zeigen einige Meßdaten bei anderen Anordnungen der Hallkontakte. Experimentell (und theoretisch) ergibt sich:

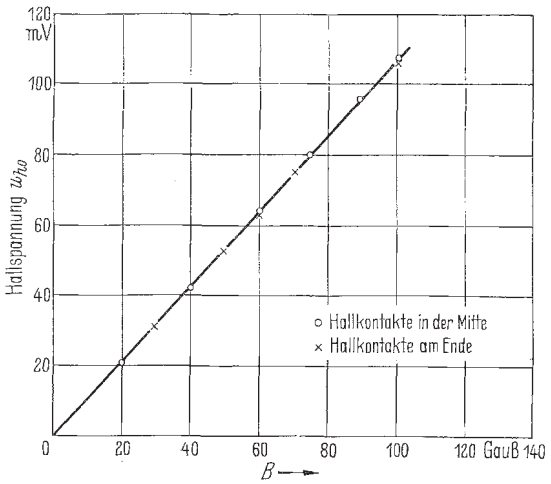

Bild 11. Messungen der Hallspannung bei zwei Anordnungen der Hallkontakte unter vergleichbaren Bedingungen.

$$\left.\begin{aligned} u_{13} = u_{24} &= \frac{1}{2}\,(u_{12} + u_{h0}) \\ u_{14} = u_{23} &= \frac{1}{2}\,(u_{12} - u_{h0})\,. \end{aligned}\right\} \qquad (1{,}1)$$

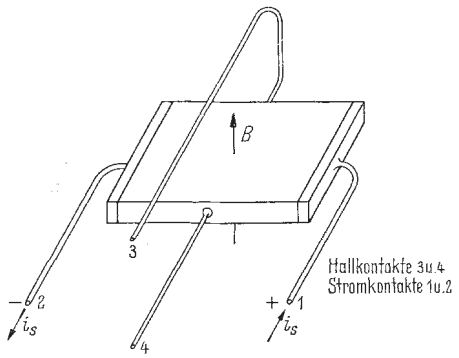

Bild 12. Zur Bezeichnung der verschiedenen Hallspannungen.

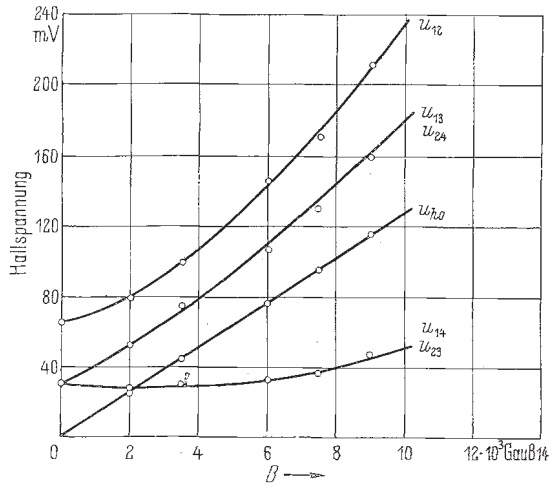

Bild 13. Werte verschiedener Hallspannungen bei Gleichstrom $i_s = 100$ mA (Bild 12) und zeitlich konstanter Induktion B.

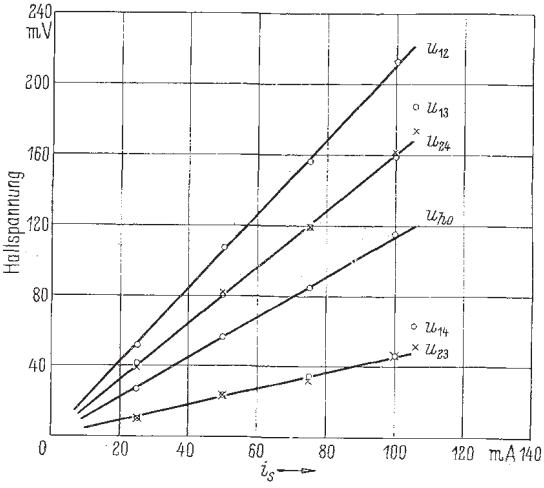

Bild 14. Weitere Hallspannungsmessungen zwischen verschiedenen Kontakten des Bildes 12. Meßbedingungen wie in Bild 13 ($B = 9000$ Gauß).

Diese Beziehungen gelten bei einer zeitlich konstanten Induktion und bei Gleichstrom durch das Hallelement. Wenn sowohl die Induktion als auch der Strom Wechselgrößen gleicher Frequenz und Phase sind, während die Hallspannung mit einem Drehspulmillivoltmeter gemessen wird, ergibt sich:

$$u_{14} = u_{13} = u_{24} = u_{23} = \frac{1}{2}\,u_{h0}\,. \qquad (1{,}2)$$

Hier bezeichnet u_{h0} die Hallspannung zwischen den Punkten 3 und 4 des Bildes 12. Die Gl. (1,2) wird durch die Messungen des Bildes 15 bestätigt.

II. Wattmeterschaltungen

Bekanntlich existieren keine Wattmeter vom elektrodynamischen Typ, mit welchen die Leistung (Wirkleistung, Blindleistung oder Scheinleistung) eines Dreiphasennetzes mit Nulleiter durch eine einzige Anzeige erfaßt wird. Die für diesen Zweck bekannte Dreiwattmetermethode benutzt drei gesonderte Einphasenwattmeter, deren Anzeigen addiert werden müssen [6].

Mit Hilfe dreier Hallelemente nach Bild 1 wird die in der Einleitung unter 1. gestellte Aufgabe bezüglich der Wirkleistungsmessung durch die in Bild 16 angegebene Schaltung gelöst. Die gesamte Hallspannung u_{h0} wird von einem Drehspulmillivoltmeter angezeigt und ist der Wirkleistung des Dreiphasennetzes proportional. Die magnetischen Induktionen B der drei Hallelemente sind bzw. den Strömen der drei Phasenleitungen proportional. Die drei Ströme durch die Hallelemente werden in Reihe mit je einem Widerstand R und einer Kapazität C von je einer Phasenspannung des Netzes erzeugt und sind somit je einer Phasenspannung proportional. Die Werte R und C genügen der Ungleichung $\omega R C \gg 1$, wo ω die Grundkreisfrequenz des Netzes ist. Hierdurch sind die Ströme durch die Hallelemente mit den betreffenden Phasenspannungen gleichphasig. Die verwendeten Kondensatoren C sind vom elektrolytischen Typ. Daher ist noch eine Batteriespannung (der Batterie wird praktisch kein Strom entnommen) in Verbindung mit Widerständen r_c derart angeordnet, daß die Polarität der Elektrolytkondensatoren gewahrt bleibt. Durch geeignete Wahl der Parallelwiderstände Sh kann der Proportionalitätsfaktor der Induktion $B = k_I I$ zu dem betreffenden Phasenstrom in gewünschter Weise geändert werden. Durch geeignete Wahl der Widerstände R kann der Proportionalitätsfaktor $i_h = k_U U$ des Stromes i_h durch das Hallelement zur Phasenspannung U nach Wunsch geändert werden. An Stelle des Widerstandes R kann ein phasentreuer Spannungswandler, an Stelle des Widerstandes Sh ein phasentreuer Stromwandler verwendet werden.

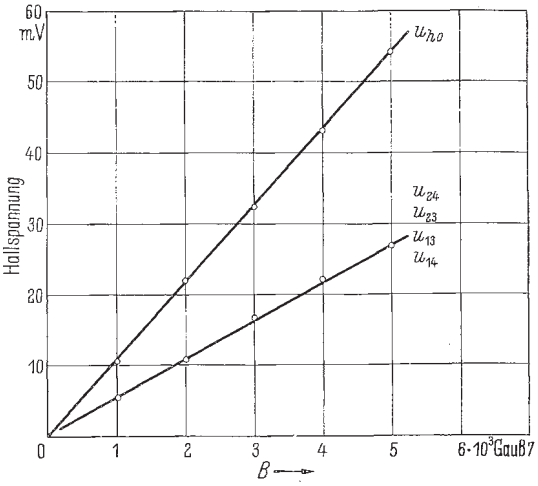

Bild 15. Hallgleichspannung bei Wechselinduktion und Wechselstrom gleicher Frequenz und Phase durch das Hallelement. Kontaktbezeichnungen nach Bild 12. (i_s = 100 mA).

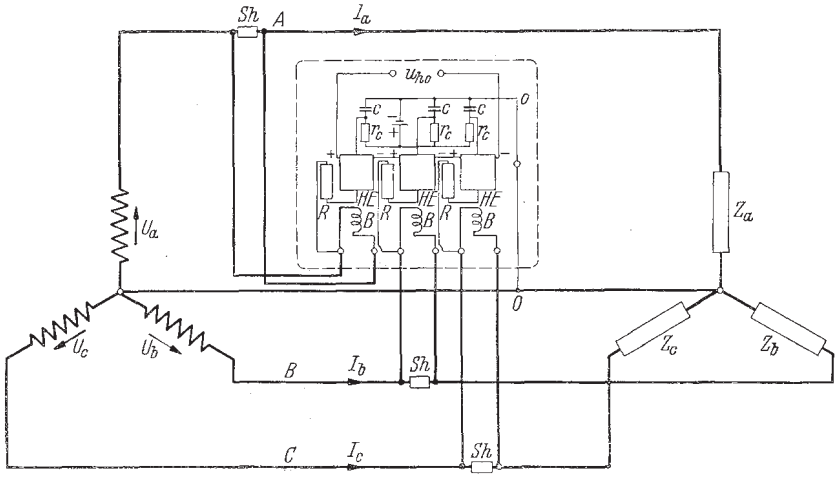

Bild 6. Schaltbild eines Hallwirkleistungswattmeters mit einer einzigen Anzeige für die Wirkleistung eines Dreiphasennetzes mit Nulleiter. Beschreibung im Text.

Wir wollen zeigen, daß bei der Anordnung des Bildes 16 der Gleichspannungsanteil von u_{h0} zur Wirkleistung des Netzes proportional ist. Es gelten die Beziehungen (für eine Phase):

$$i_h = k_U U_{max} \sin \omega t;$$

$$B = k_I I_{max} \sin (\omega t + \varphi);$$

$$u_{h01} = \frac{1}{2} k k_U k_I U_{max} I_{max} \cos \varphi -$$

$$- \frac{1}{2} k k_U k_I U_{max} I_{max} \cos (2 \omega t + \varphi).$$

Der Gleichspannungsanteil $\bar{u}_{h01}$ von u_{h01} ist somit der Wirkleistung einer Phase proportional. Der Faktor k ist die Hallkonstante des Hallelementes. Bei geeigneter Addition der Hallspannungen $\bar{u}_{h01}$, wie in Bild 16 gezeigt, erhalten wir eine gesamte Hallgleichspannung $\bar{u}_{h0}$, welche proportional zur Wirkleistung des Netzes ist. Es sei darauf hingewiesen, daß in Bild 16 die in Bild 10 angegebene Anordnung der Hallkontakte verwendet wurde.

Wenn wir die Blindleistung des Netzes messen wollen, kann die Induktion B durch die Phasenspannung erzeugt werden und der Strom i_h durch das betreffende Hallelement durch den Phasenstrom. Wir zeigen diese Anordnung für eine Phase in Bild 17. Hier gilt dann:

$$i_h = k_I I_{max} \sin(\omega t + \varphi);$$
$$B = k_U U_{max} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Folglich ist:

$$u_{h01} = \frac{1}{2} k k_I k_U I_{max} U_{max} \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{1}{2} k k_I k_U I_{max} U_{max} \cos\left(2\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right).$$

Der Gleichspannungsanteil $\bar{u}_{h01}$ von u_{h01} ist offenbar zur Blindleistung der betreffenden Phase proportional.

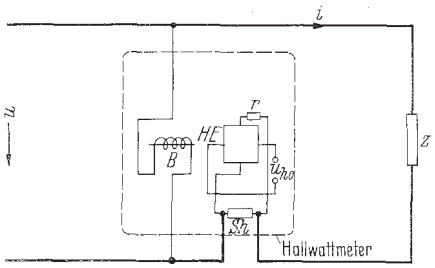

Bild 17. Messung der Blindleistung eines Einphasennetzes mit einem Hallwattmeter (Hallelement HE).

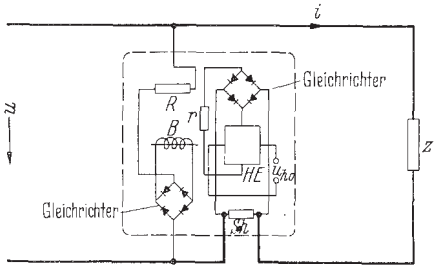

Bild 18. Messung der Scheinleistung eines Einphasennetzes mit einem Hallwattmeter (Hallelement HE).

Das Schaltbild 17 kann jedoch nicht auf Mehrphasennetze übertragen werden. Zur Messung der Blindleistung von Dreiphasennetzen mit Nulleiter kann das Schaltbild 16 verwendet werden, indem die Reihenwiderstände R durch geeignete Drosselspulen ersetzt werden. Die Induktivität L jeder Drossel muß der Bedingung $\omega^2 L C \gg 1$ genügen.

Wenn wir die Scheinleistung des Netzes messen wollen, so muß der Strom durch jedes Hallelement proportional zum Effektivwert der Netzspannung und die Induktion proportional zum Effektivwert des Netzstromes sein. Diese Effektivwerte werden durch geeignete Gleichrichtung erhalten. Eine Schaltung für eine Netzphase ist in Bild 18 angegeben worden.

Für Dreiphasennetze ohne Nulleiter vereinfacht sich die Schaltung des Bildes 16 erheblich (Bild 25). Die betreffenden Schaltungen sind ausgearbeitet und erprobt worden, sollen hier aber aus Platzgründen übergangen werden. Auch für Sonderfälle, wie symmetrische Netzspannungen, oder Vektorsumme der Netzspannungen gleich Null sind vereinfachte Schaltungen erprobt worden.

III. Temperaturunabhängige Anzeige

Aus den Kurven der Bilder 7 und 8 geht hervor, daß die Daten der Hallelemente stark temperaturabhängig sind. Nach einigen Vorversuchen, bei denen eine mehr oder weniger gute Kompensation dieser Temperaturabhängigkeit erzielt wurde, ist die hier zu beschreibende Schaltung als befriedigende Lösung dieser Aufgabe ermittelt worden. Wir gehen davon aus, daß wegen der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes zwischen den Hallkontakten und wegen der Abhängigkeit dieses Widerstandes von der Induktion (GAUSSeffekt, vgl. Bild 9) nur ein sehr kleiner Teil der verfügbaren Halleistung zur Anzeige oder zu Regelungszwecken benutzt werden darf. Bei einer bestimmten Temperatur sei die Leerlaufhallspannung gleich u_{h0} und die Hall-

spannung über einem Widerstand R gleich u_h. Dann ist:

$$u_h = u_{h0} \frac{R}{R_h + R} = \frac{u_{h0}}{\frac{R_h}{R} + 1}.$$

Der Widerstand R_h zwischen den Hallkontakten darf, damit seine Änderungen keinen Einfluß auf u_h haben, nur ein sehr kleiner Bruchteil von R sein. Wir haben bei Zimmertemperatur $R_h/R < 1/700$ gewählt. Hierdurch wird die Halleistung P_h im Widerstand R ein kleiner Bruchteil der verfügbaren Halleistung $P_{h0} = u_{h0}^2/4\,R_h$:

$$P_h = \frac{P_{h0}}{\frac{1}{2} + \frac{1}{4}\frac{R_h}{R} + \frac{1}{4}\frac{R}{R_h}}.$$

Man könnte zwar durch einfache Schaltmittel die Abhängigkeit des Widerstandes R_h von der Induktion kompensieren, aber solche Schaltungen könnten praktisch nur bei einer Temperatur richtig funktionieren und wären daher nutzlos.

Die Idee der vorliegenden Temperaturkompensation beruht auf der Verwendung des Hallelementes selber als kompensierenden temperaturabhängigen Widerstand. Nach obigem ist die Hallspannung am Nutzwiderstand gleich der Leerlaufhallspannung.

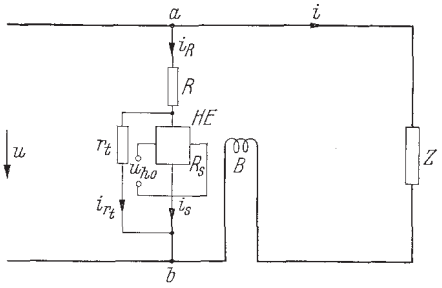

Bild 19. Grundsätzliche Schaltung zur Erzielung temperaturunabhängiger Hallspannungen. R_s ist der Widerstand des Hallelementes zwischen den Stromkontakten 1, 2 des Bildes 1.

Diese ändert sich mit der Temperatur für das verwendete Hallelement wie in Bild 7 angegeben. Andererseits ändert sich der Widerstand zwischen den Stromkontakten des Hallelementes nach Bild 8. Es kommt nun darauf an, den Strom durch das Hallelement mit wachsender Temperatur derart zu steigern, daß hierdurch die Abnahme der Hallspannung nach Bild 7 kompensiert wird. Dies kann dadurch erreicht werden, daß parallel zu den Stromkontakten des Hallelementes ein Widerstand r_t nach Bild 19 geschaltet wird, der sich nur relativ geringfügig mit der Temperatur ändert. Bei wachsender Temperatur nimmt der Strom i_s dann relativ zum Gesamtstrom i_R (vgl. Bild 19) stark zu und kann so die Spannungsänderung nach Bild 7 kompensieren.

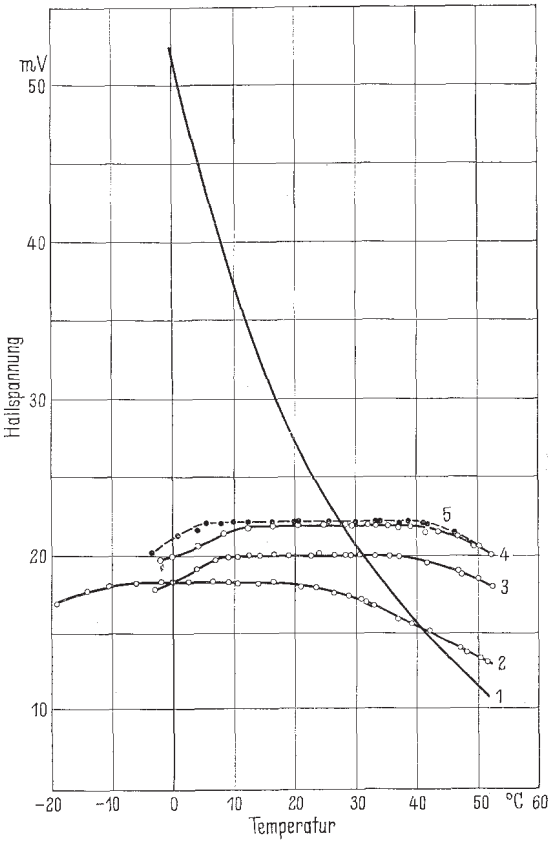

Bild 20. Ergebnisse des Schaltbildes 19. Beschreibung der Kurven im Text.

Die mit praktischen Anwendungen dieser Idee erzielten Erfolge zeigt Bild 20. Die Kurve 1 entspricht dem Bild 7. Die Kurve 2 wurde bei einem Gesamtstrom i_R von 500 mA bei einer Induktion $B = 2500$ Gauß gemessen. Als Parallelwiderstand r_t wurde ein Manganindraht von 0,157 Ohm verwendet. Bei der Kurve 3 ist die Induktion die gleiche, der Gesamtstrom i_R jedoch gleich 800 mA. Der Widerstand r_t besteht in diesem Fall aus einem Manganindraht von 0,0875 Ohm.

Zur Verbesserung der Endkurve wird als Parallelwiderstand ein Nickeldraht, mit positivem Temperaturkoeffizienten seines Widerstandes verwendet, wobei $r_t = 0{,}116$ Ohm bei 20° C ist. Bei gleicher Induktion und einem Gesamtstrom i_R von 700 mA entsteht die Kurve 4 des Bildes 20. Zur weiteren Verbesserung der Temperaturkurve wird der Parallelwiderstand r_t aufgespalten in einen Nickeldraht von 0,103 Ohm bei 20° C in Reihe mit einem Manganindraht von 0,029 Ohm. Hierdurch wird bei gleicher Induktion und bei einem Gesamtstrom von 700 mA die Kurve 5 des Bildes 20 erzielt, welche vollkommene Temperaturunabhängigkeit der Hallspannung zwischen 6 und 40° C zeigt. Durch weitere Unterteilung von r_t wäre zweifellos eine Erweiterung des temperaturunabhängigen Teiles der Hallspannungskurve möglich. Obige Werte wurden auf Grund einfacher Rechnungen erhalten, bei denen die Kurven der Bilder 7 und 8 durch Exponentialformeln angenähert dargestellt wurden. Diese Rechnungen werden hier aus Platzgründen übergangen.

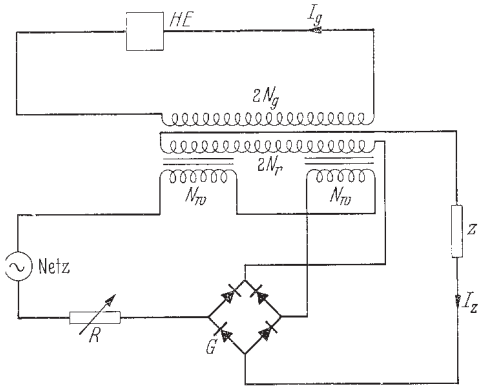

Bild 21. Schaltbild des verwendeten magnetischen Verstärkers.

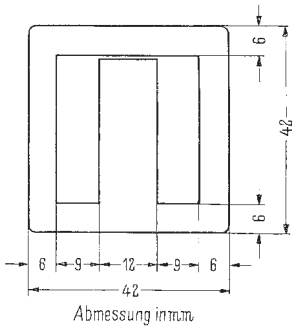

Bild 22. Kernabmessungen des verwendeten magnetischen Verstärkers.

IV. Leistungsverstärkung, Konstruktion, Eichung

Die dem Hallelement zu entnehmende Leistung liegt nach obigem z. B. in der Größenordnung von etwa 0,1 Microwatt. Für Regelungszwecke (Relais) ist eine Leistung von etwa einigen Milliwatt erforderlich. Hierdurch wird eine etwa 2000-fache Leistungsverstärkung erforderlich. Grundsätzlich könnten Elektronenröhren oder Transistoren zur Leistungsverstärkung herangezogen werden. Wir haben einen magnetischen Verstärker gewählt, weil dieser durch robusten Bau und große Lebensdauer Vorteile aufweist.

Die hier verwendete Schaltung ist in Bild 21 dargestellt worden. Sie enthält zwei möglichst identische mit je drei Wicklungen N_g, N_r und N_w bewickelte Kerne. Die Hallkontakte des Hallelementes *HE* sind mit den zwei gleichsinnig in Reihe geschalteten Gleichstromwicklungen N_g verbunden. Der Gesamtwiderstand von $2\,N_g$ ist 730, 6 Ohm. Die beiden Rückkopplungswicklungen N_r sind ebenfalls gleichsinnig in Reihe geschaltet. Der Gesamtwiderstand von $2\,N_r$ ist 21,2 Ohm. Die beiden Wechselstromwicklungen N_w sind gegensinnig in Reihe geschaltet. Der Gesamtwiderstand von $2\,N_w$ ist 22,5 Ohm. Im Gleichrichter *G* wurden Selenplättchen verwendet. Mit Hilfe von *R* wurde der Speisestrom eingestellt. Die Kernabmessungen werden in Bild 22 gezeigt. Jeder Kern besteht aus 43 Stück Stanzbleche von 0,048 mm Dicke und 30 Stück Stanzbleche von 0,095 mm Dicke aus μ-Metall. Die Windungszahlen sind: $2\,N_g = 5000$ aus 0,12 mm Emaildraht; $2\,N_r = 461$ aus 0,2 mm Emaildraht; $N_w = 470$ aus 0,2 mm Emaildraht. Die Kennlinie des magnetischen Verstärkers bei $Z = 0$ (Bild. 21) ist in Bild 23 dargestellt worden. Experimentell wurde gefunden, daß eine möglichst günstige Leistung dem Verstärker bei einem Nutzwiderstand Z von etwa 43 Ohm entnommen werden kann. Für diesen Nutzwiderstand ist das Verhältnis der Ausgangsnutzleistung zur Eingangsleistung in Bild 24 gezeigt worden. Die nützliche Leistungsverstärkung ist etwa 1900 und entspricht den gestellten Anforderungen. Auch die Linearitätsforderung ist für die verwendeten Eingangsnutzströme von kleinen Bruchteilen eines Mikroampere erfüllt. Einrichtungen zum Konstanthalten der Speisespannung sind nicht gezeigt.

Bei der Konstruktion der Mehrphasenwattmeter nach dem Schaltbild 16 ist es wichtig, daß die verschiedenen Teile (hier drei) des Wattmeters gleiche Eigenschaften haben. Dies bedingt die Verwendung dreier identischer Kerne mit identischen Wicklungen. Die Halleigenschaften der drei Hallelemente werden im allgemeinen Unterschiede aufweisen. Diese können dadurch ausgeglichen werden, das die Hallelemente in den drei Luftspalten nicht ganz gleich angeordnet werden, sondern leicht um eine Achse, die senkrecht zur kleinsten Luftspaltabmessung steht, gedreht werden. Eine solche Drehung erlaubt eine genaue gegenseitige Abgleichung der Hallempfindlichkeiten. Weiter kann der Strom durch die Hallelemente mittels geeigneter Reihenwiderstände

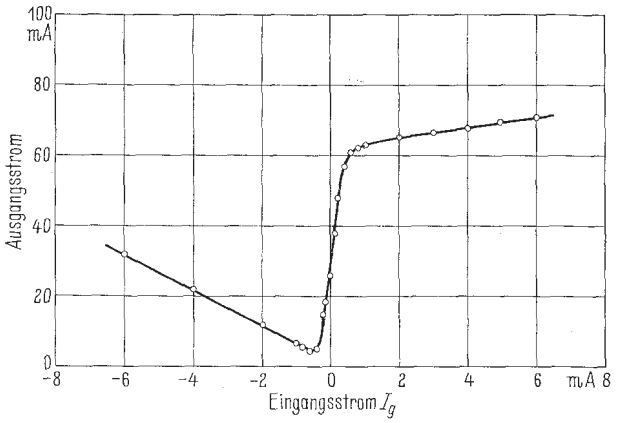

Bild 23. Kennlinie des magnetischen Verstärkers.

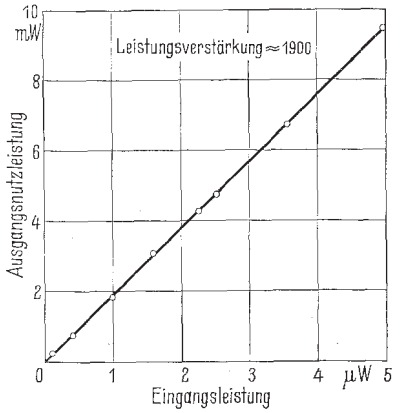

Bild 24 Leistungsverstärkung des magnetischen Verstärkers. Die Eingangsleistung geht in die Gleichstromwicklung hinein. Die Ausgangsnutzleistung geht in den Nutzwiderstand Z hinein.

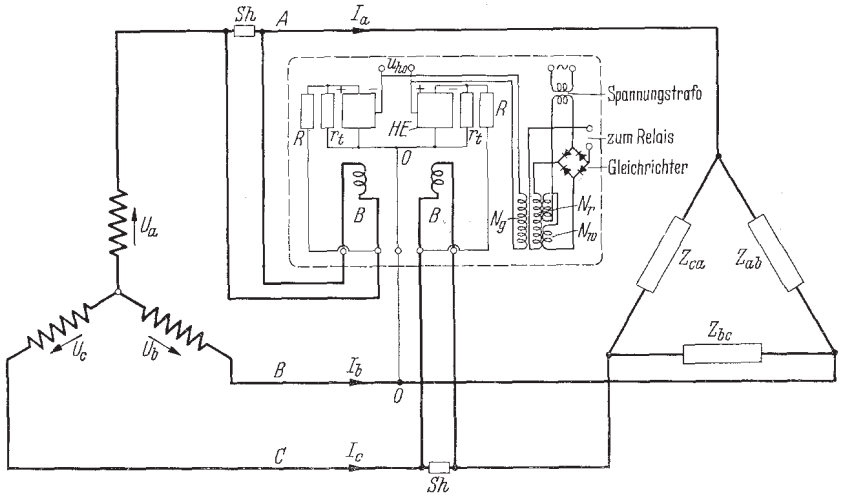

Bild 25. Gesamtschaltbild eines Hallwirkleistungswattmeters für Dreiphasennetze ohne Nulleiter unter Verwendung eines magnetischen Verstärkers.

so abgeglichen werden, daß die Hallspannungen bei gleicher Induktion und bei gleicher Phasenspannung gleich sind.

Ein fertiges Hallwattmeter nach Schaltbild 16, aber für ein Dreiphasennetz ohne Nulleiter (Bild 25) wurde mit einem elektrodynamischen Wattmeter der Klasse 0,2 verglichen. Das Millivoltmeter hatte die Klasse 0,5. Innerhalb der hierdurch bedingten Fehlergrenzen wurde Übereinstimmung der Anzeigen erzielt (ohne magnetischen Verstärker).

Die vorliegende Arbeit wurde durch Kredite aus der Schenkung Brown Boveri & Cie, Baden und aus dem Aluminiumfonds Neuhausen ermöglicht. Hierfür soll an dieser Stelle der gebührende Dank ausgesprochen werden.

Für eine ausführlichere Veröffentlichung dieser Arbeiten sei nach einer Dissertation des zweiten Verfassers an der Eidgenössischen Technischen Hochschule 1955 verwiesen (Nr. 25/8).

Zusammenfassung

Im einleitenden Abschnitt I werden die drei Forderungen angegeben, welche an die hier beschriebenen Geräte gestellt werden: 1. Leistungsanzeige durch ein einziges Instrument bei Mehrphasennetzen; 2. die Anzeigeleistung soll mindestens einige Milliwatt betragen (zur Betätigung von Relais); 3. die Anzeige soll von etwa 5—40° C für die Klasse 0,2 temperaturunabhängig sein. Diese Forderungen werden mit Hilfe von Indiumantimonid-Hallplättchen erfüllt, deren Daten und Kennlinien angegeben werden. Im Abschnitt II wird die Schaltung angegeben und diskutiert, welche im Falle eines Dreiphasennetzes mit Nulleiter zum Ziel führt. Im Abschnitt III wird das verwendete Verfahren zur Erzielung einer temperaturunabhängigen Anzeige beschrieben. Der Abschnitt IV beschäftigt sich mit der Leistungsverstärkung mittels eines magnetischen Verstärkers, sowie mit der Konstruktion und der Abgleichung des Gerätes. Schließlich werden Eichergebnisse erwähnt. Die eingangs gestellten Forderungen werden hierdurch erfüllt.

Literatur

[1] Barr, A. C. D. & E. H. Frost-Smitt: Magnetic cores for instrument transductors. Soft magnetic materials for telecommunications. Richards, C. E. and A. C. Lynch, Pergamon Press London (1953), S. 301. — [2] Breckenridge, G. R.: Semiconducting intermetallic compounds. Phys. rev. 90 (1953). S. 488. — [3] Gale, H. M. & P. D. Atkinson: A theoretical and experimental study of the series connected magnetic amplifier. Proc. Inst. El. Engrs. London, V. 96 Part I, May (1949), S. 99. — [4] Geyger W. A.: Magnetic amplifier circuits. Mc Graw-Hill, (1954). — [5] Hartel, W.: Anwendung der Hallgeneratoren. Siemens-Zeitschrift 28, (1954), S. 376. — [6] Keinath, G.: Archiv für Technisches Messen, J. 741 — 1, J 742—2, J 741—4, J 741—5, J 741—6, J 741—8, J 741—9, J 741—10, Verlag Oldenbourg, München. — [7] Kuhrt, F.: Eigenschaften der Hallgeneratoren. Siemens-Zeitschrift 28 (1954), S. 370. — [8] Weiss, H.: Über die elektrischen Eigenschaften von InSb. Zeitschrift für Naturf. 8a (1953), S. 463. — [9] Welker, H.: Neuere Untersuchungen der Halbleitereigenschaften von III-V-Verbindungen. Scientia Electrica, Heft 4, Nov. (1954) S. 152.

Prof. Dr. Dr.-Ing. E. h. M. J. O. Strutt, Direktor des Instituts für höhere Elektrotechnik an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.